

3 本主桁橋梁モデルを対象とした 1 次モード特性の変化に基づく 損傷同定手法に関する研究

徳島大学大学院 学生会員 ○渡邊 健一 徳島大学大学院 フェロー 成行 義文

近畿地方整備局 正会員 角田 豊土 徳島大学大学院 正会員 井上 貴文

1. はじめに 高度経済成長期に建設された道路橋は、建設から約 50 年が経過している。この間に道路橋には微小な損傷が蓄積し、崩壊等の危険性が高まっていると考えられる。したがって、損傷状態を把握する必要がある、そのため実用的な手法としてモード解析による損傷同定手法が注目されている。本研究では、モード解析に基づく道路橋の損傷同定手法を確立するための基礎的な研究として、実橋梁を対象としたモード解析指標より、1 次モード特性を用いた一損傷同定手法を導き、適用例により妥当性を示した。

また、簡易的な室内実験により橋梁モデルのモード特性を計測し、導いた損傷同定手法に適用して検証を行った。

2. 単純合成 H 型鋼橋 対象橋梁は図 1 に示す様な、全幅 6.7m、支間長 10.8m の 3 本主桁単純合成 H 型鋼橋とした。解析モデルはほとんどの要素をシェル要素から構成される 3 次元 FEM モデルとし、移動支承の摩擦の影響を考慮するために移動支点にバネ要素を付属させた。なお、モード解析には汎用解析ソフト「T-DAPⅢ」を用いた。また橋梁の損傷を主桁剛性(EI)の低下と定義し、解析における剛性低下は便宜的に損傷個所の弾性係数(E)を低減することにより表現した。損傷シナリオは表 1 に示すような、「損傷桁の組合せ」(A1～A5)、「損傷位置」(B1～B3)ならびに「損傷度(剛性低下率)」(C1～C4)の組合せによる 60 パターンに無損傷のケースを加えた 61 パターンとした。

3. モード形変化率 α 本研究では、実橋梁での測定の容易さを考慮し、図 1 に示すような 10 点(左から W1,W2,G1-S,・・,W4)に注目し、各点を通る橋軸方向ラインの 1 次モード変形時の鉛直成分を各ラインのモード形と呼ぶ。なお、損傷前後における各注目ラインのモード形の変化の評価手法として、式 (1) のような 2 つのモード間の相関を表す評価基準 MAC を用いた「モード形の変化率 α 」を式 (2) のように定義した。損傷前後のモード形の差が大きいほど α は大きな値を示す。主桁 G1,G2 の 1/2 付近が損傷した場合のモード形変化率を、損傷度毎に最大値で正規化したグラフを図 2 に示す。G1,G2 の注目ラインの変化率比が G3 よりも相対的に大きく、剛性低下率によらずほぼ一定値を示すことから、モード形変化率を求めることで損傷主桁の特定が可能であると考えられる。

4. 部分 MAC 本研究では MAC を主桁の注目ラインにおいて指定した 6 つの区間 ($\alpha 1 \sim \alpha 6$) 毎に適用する(部分 MAC)ことで、橋軸方向における損傷位置(剛性低下位置)を特定した。各損傷位置(B1～B3)における部分 MAC を適用した際のモード形変化率比のグラフを図 3 に示す。各損傷位置付近における区間の変化率 ($\alpha 1 \sim \alpha 6$) が極大値を取ることから損傷位置を特定できるが、損傷桁の配置が非

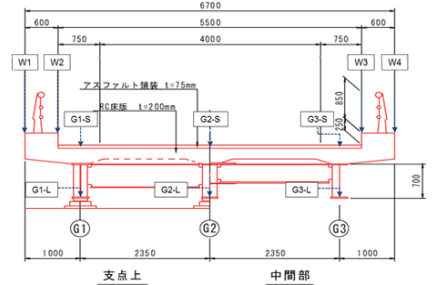


図 1 解析対象橋梁

表 1 損傷シナリオ

損傷桁の組合せ(A)	損傷位置(B)	損傷度(C)
A1 G1,G2,G3	B1 支間 1/2 点付近	C1 5%
A2 G1,G2	B2 支間 1/4 点付近	C2 10%
A3 G1,G3	B3 支点付近	C3 20%
A4 G1		C4 40%
A5 G2		

$$MAC(\phi_a, \phi_b) = \frac{|\{\phi_a\}^T \{\phi_b\}|^2}{(\{\phi_a\}^T \{\phi_a\})(\{\phi_b\}^T \{\phi_b\})} \quad (1)$$

$$\alpha = 1.0 - MAC(\phi_a, \phi_b) \quad (2)$$

ϕ_a : 損傷前のモードベクトル
 ϕ_b : 損傷後のモードベクトル

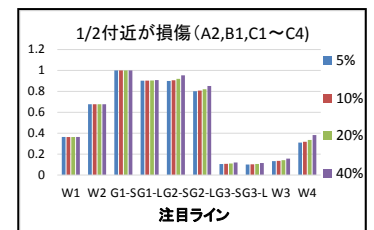


図 2 G1, G2 損傷の変化率比

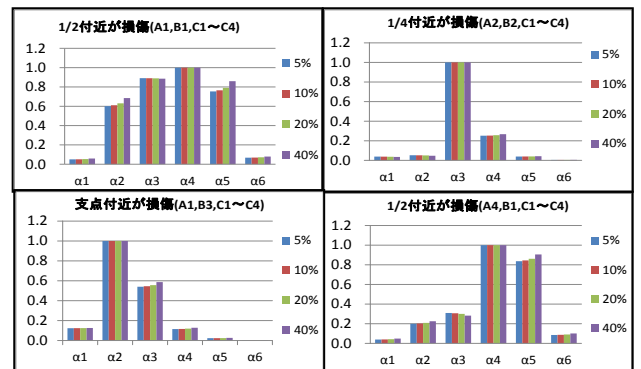


図 3 部分 MAC による変化率比 (G1-L)

対称の場合の G1 ラインにおけるグラフは $\alpha 4, \alpha 5$ のみ卓越するので、G1 の影響を受ける G2 ラインのモード形変化率（図 4）を見ることで 1/2 付近が損傷していると特定できる。

5. 剛性低下率の同定 図 5 中の式 (3) は固有振動数の定義式であり、1/2 付近が損傷した場合の剛性低下率と固有振動数低下率の回帰曲線および回帰式を図 5 に示す。損傷主桁の同定後に固有振動数低下率を求め、適する回帰曲線により剛性低下率を推定する。

6. 損傷同定手法 提案手法の流れについて述べる。なお、予め対象橋梁に対してモード解析等を行い、損傷前後のモード特性を把握しておく必要がある。まず、損傷前後のモード形から注目ライン毎のモード形変化率のグラフを作成することで、損傷主桁を特定する。次に、特定した主桁ラインのモードにおいて橋軸方向 6 分割された各区間のモード形変化率により、主桁の損傷位置を特定する。最後に固有振動数低下率と回帰式より剛性低下率を推定する。主桁 G2 の 1/2 付近が 18% 損傷したシナリオを設定して本手法に適用した結果、損傷主桁及び位置が特定でき、剛性低下率は 18.02% と精度よく推定できた。

7. 橋梁模型 本実験で使用した橋梁模型を図 6 に示す。全幅 670mm、支間長 1080mm とし、これは単純合成 H 型鋼橋の 1/10 スケールであり、RC 床板としてアクリル板を用い、また主桁および横桁としてアルミ平棒を組み合わせた模型とした。また図 7 は本実験で用いた実験装置であり、重りを橋梁模型の中心部に载荷させて約 1cm たわませ、重りを除荷させて振動する状態をレーザ変位計で計測した。損傷シナリオについては表 2 に示す 12 パターンと無損傷の 1 ケースとし、それぞれ 10 回計測を行った。

8. 損傷同定手法の適用 実験値によるモード特性を用いて、損傷同定手法の妥当性について検証する。なお、橋梁模型の解析モデルを「T-DAPⅢ」を用いて作成し、同定結果を比較した。まず 1/4 付近が損傷した場合の損傷主桁の同定結果を図 8 に示す。(a),(c)は精度よく求まったが(b),(d)については差が出てしまい、G2 の振幅に対して補正が必要であると思われる。次に 4 分割した区間におけるモード形変化率比の適用結果を図 9 に示す。1/4 付近では $\alpha 2$ においてともに極大値を示したが、1/2 付近の場合は特定するには曖昧な結果となり、モード形に対して振幅を計測する点の数を増やす必要がある。剛性低下率の推定では、最も設定値に近い結果として G1,G3 の 1/2 付近が 40% 損傷した場合で誤差が +7.31% となり、解析モデルの拘束を緩和、あるいは橋梁模型の支点拘束の強化等の対策が必要である。

9. おわりに 3 本主桁の単純合成 H 型鋼橋を対象とした解析結果より、1 次モード特性の変化に基づく損傷同定法を導きその適用性を示した。今後、ノイズの本損傷同定手法の精度に及ぼす影響について検討するとともに、室内実験方法の改良について検討を進める予定である。

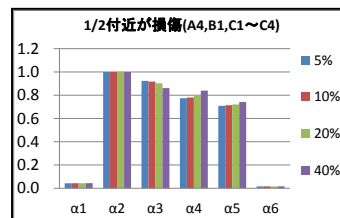


図 4 注目ライン G2-L

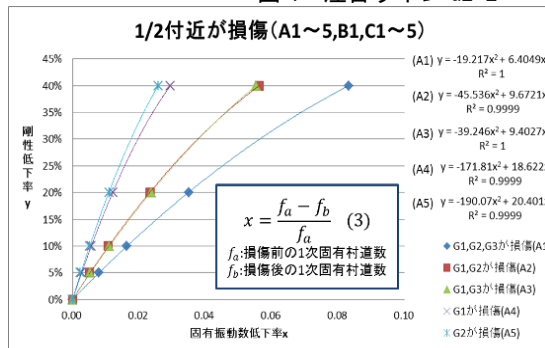


図 5 回帰曲線

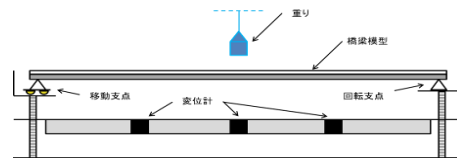


図 7 実験装置

表 2 損傷シナリオ

損傷桁の組合せ (a)		×	損傷位置および損傷度 (b)	
a1	G1,G2		b1	支間 1/2 付近
a2	G1,G3		b2	支間 1/2 付近
a3	G1		b3	支間 1/4 付近
a4	G2			

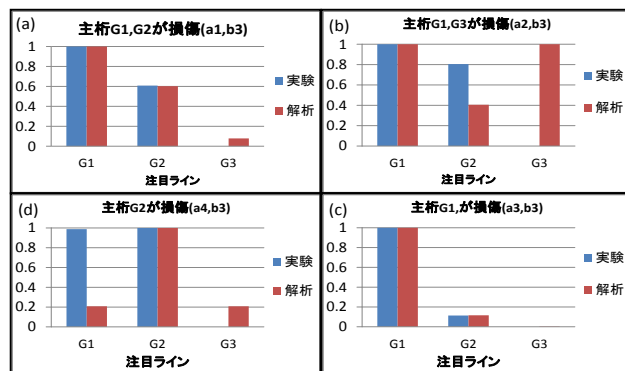


図 8 1/4 付近が損傷した場合の変化率比

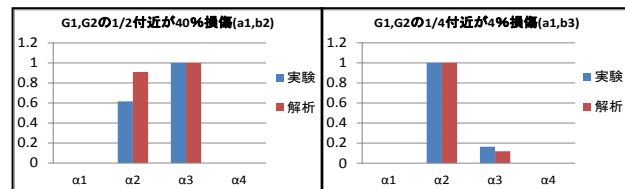


図 9 G1 のモード形変化率比 (4 分割)